



## **Contribution à la mise en place d'une architecture modulaire pour la conception des microsystèmes de production.**

Dominique Gendreau, Michaël Gauthier, David Hériban, Philippe Lutz

### **► To cite this version:**

Dominique Gendreau, Michaël Gauthier, David Hériban, Philippe Lutz. Contribution à la mise en place d'une architecture modulaire pour la conception des microsystèmes de production.. 7ème Congrès International de Génie Industriel, GI'2007, Trois Rivières., Jun 2007, Québec, Canada. sur CD ROM - 10 p. hal-00162936

**HAL Id: hal-00162936**

**<https://hal.science/hal-00162936>**

Submitted on 16 Jul 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Contribution à la mise en place d'une architecture modulaire pour la conception des microsystèmes de production

**Dominique Gendreau, Michaël Gauthier, David Hériban, Philippe Lutz**

Laboratoire d'Automatique de Besançon – UFC-ENSMM-CNRS UMR 6596

24, rue Alain Savary – 25000 Besançon, France

[dgendreau@ens2m.fr](mailto:dgendreau@ens2m.fr), [gauthier@ens2m.fr](mailto:gauthier@ens2m.fr), [dheriban@ens2m.fr](mailto:dheriban@ens2m.fr), [plutz@ens2m.fr](mailto:plutz@ens2m.fr)

---

*RÉSUMÉ : les microsystèmes de production ont la dualité d'opérer dans l'univers particulier du micromonde et de constituer un système de production à part entière. Ainsi, ils ont la nécessité de pouvoir s'intégrer dans un milieu fondamentalement différent de l'échelle humaine. De plus, il leur faut assurer un certain niveau de productivité, de flexibilité et de réactivité leur permettant de constituer un système performant pour la réalisation de microproduits. L'objectif de nos travaux de recherche est de pouvoir intégrer tous les facteurs inhérents à cette situation dans une méthodologie visant à proposer une architecture modulaire de microsystèmes de production. La première étape consiste à faire une analyse fonctionnelle du système, associée à une modélisation des données permettant ainsi de définir une architecture générale. L'introduction de choix techniques constitue la seconde étape utile à l'ordonnancement des tâches (ou scénario de production) qui pourra être exécuté par le microsystème de production. La description de chacune des tâches prend en compte d'une part le comportement réel de chaque composant (technologie, dimensionnement, temps de réponse, ...) et d'autre part les actions que la commande est susceptible de pouvoir exécuter. On définit alors la notion de « module » qui englobe l'équipement matériel, un modèle de comportement et la commande spécifique associée.*

*MOTS-CLÉS : conception des systèmes de production, méthodologie de conception, spécification formelle, modularité.*

---

## 1. Introduction

L'objectif de nos travaux est de définir une architecture modulaire pour la conception, mais aussi pour la commande et pour la maintenance des microsystèmes de production. Ces systèmes de production sont conçus pour être adaptés à la réalisation des produits micromécatroniques qui trouvent applications dans le médical, les télécommunications, le son, l'image, l'automobile ou encore l'électroménager. La simple transposition des architectures des systèmes mesométriques (de taille humaine) ne permet pas d'atteindre des standards de production satisfaisants.

Le développement des fonctionnalités des microproduits (MEMS) est actuellement en partie limité par l'absence de systèmes de production par micro-assemblage qui faciliteraient l'hybridation de technologies. Or, l'étude du micro-assemblage est rendue difficile par les perturbations intrinsèques aux échelles microscopiques que subissent les micro-objets à assembler (micromonde).

Nous proposons une méthodologie consistant à mettre en place une démarche rationnelle d'analyse et de spécification de ces systèmes. En particulier, nous développons les outils utilisés à chaque étape de cette démarche. Enfin, les premiers éléments de l'application de cette méthode à un prototype de système de micro-assemblage seront présentés.

## **2. Spécificité des microsystemes de production**

On appelle « microsysteme de production » tout systeme employant des techniques et mettant en œuvre des technologies spécifiques à la réalisation de microproduits, et dont le volume n'excède pas  $1\text{m}^3$ . Un « microproduit » est constitué par l'assemblage de plusieurs microcomposants mécatroniques, dont la taille de chaque élément n'excède pas 1mm.

Quatre différences essentielles caractérisent les systemes de production micrométriques par rapport aux systemes mesométriques (relatifs à l'échelle humaine) : l'indéterminisme du processus réalisé par le systeme, la difficulté d'intervention d'un opérateur dans le micromonde, les caractéristiques des composants de la plate-forme de production et enfin l'absence de savoir-faire « métier » dans la conception de systemes de production et des produits adaptés au miro-assemblage.

### ***2.1. Indéterminisme du processus mis en œuvre dans les microsystemes de production***

Tout systeme de production requiert un certain nombre de paramètres. Les paramètres et leur influence sont clairement identifiés et bien modélisés dans les systemes mesométriques depuis de nombreuses années, par exemple les modèles de durée de vie d'outil (Optiz, 1969). On a ainsi la possibilité d'appliquer des stratégies pour négliger, réduire ou maîtriser leur influence, et ainsi assurer un fonctionnement garantissant un niveau de qualité, de délai et de coût satisfaisant : optimisation des conditions de coupe (Lefur, 1990), optimisation des cycles de fonctionnement (Gendreau, 1991), ... Les microsystemes de production dérogent à cette règle au sens où le processus comporte le plus souvent une part importante d'indéterminisme. En effet, la conjugaison de nombreux phénomènes physiques du micromonde, bien qu'il soit développé des modèles les représentant (Gauthier, 2006a) fait qu'il est quasiment impossible de prévoir de façon satisfaisante le comportement du processus. Cet univers est ultra sensible à tous les paramètres d'environnement dont on ne peut avoir qu'une modélisation très imprécise.

### ***2.2. Niveau d'intervention d'un opérateur dans les microsystemes de production***

En l'absence de dangerosité et sous réserve d'appliquer des procédures de sécurité adéquates, il est généralement possible de faire intervenir un opérateur dans un systeme dimensionné à son échelle ; les systemes micrométriques sont quant à eux inaccessibles à celui-ci, en raison des capacités sensorielles et des précisions motrices de l'être humain. Les limites visuelles et tactiles conjuguées avec les mouvements parasites d'une amplitude de l'ordre de la centaine de micromètres rendent impossible l'intervention manuelle directe dans les microsystemes. La perception des phénomènes micrométriques ainsi que les interventions sur le microsysteme passent par conséquent obligatoirement par des interfaces adaptées et sécurisées pour ce systeme. En revanche, le systeme ne constitue pas un danger pour l'opérateur.

### ***2.3. Organisation d'une plate-forme de production en échelle micrométrique***

Un microsysteme de production a la particularité d'être composé de cellules de très petite taille, facilement déplaçables et manipulables, à l'opposé des ateliers de fabrication à notre échelle composés des machines de grandes dimensions pesant plusieurs tonnes. Il est donc facilement possible de changer la configuration matérielle (enlèvement ou ajout de cellules ou de composants) ou bien la configuration logicielle (paramétrage de la commande) de ces microsystemes de production. Chaque nouvelle production pourra donc engendrer une nouvelle disposition optimale des équipements, avec peu de contraintes sur la logistique des

flux. De plus, les caractéristiques des cellules – dimensions réduites, architecture interne, possibilités de connexion standardisée – permettent d’envisager une disposition spatiale plus audacieuse que dans le cas d’un atelier traditionnel.

#### ***2.4. Conception des microsystemes de production***

La conception d’un atelier de production passe par le choix d’équipements réalisés par des constructeurs. Chaque procédé de fabrication nécessite un savoir-faire « métier » qui permet l’étude et la réalisation de machines adaptées et performantes. A l’opposé, pour des applications micrométriques, l’offre dans la fourniture de microcapteurs ou de micro-actionneurs est sommaire et surtout n’est pas facilement intégrable dans une cellule de production de petite taille. En tout état de cause, il n’existe aucune cellule disponible sur catalogue. Le savoir-faire d’intégrateur d’équipements de ce genre se trouve disséminé dans quelques laboratoires de recherche ou auprès de quelques industriels qui développent des applications très spécifiques. Ainsi, il convient de considérer des systèmes plus autonomes, qui intègrent des solutions matérielles adaptées, des modèles qui définissent leurs comportements ainsi que des commandes élaborées et spécifiques. Cette approche intègre la notion de module. Il est également à noter qu’il n’y a pas de diffusion de « savoir-faire » concernant la conception de produits micro-assemblés.

### **3. Lignes directrices de conception des microsystemes de production**

#### ***3.1. Cadre d’application***

Le volume de la fabrication des microproduits auquel répond le concept de « microsysteme de production » concerne les petites ou moyennes séries réalisées par lots. Cela exclut, en particulier, à la fois la production de pièces unitaires qui fait l’objet d’un travail manuel ou assisté et la production de pièces en grande série qui est assurée par des systèmes de production spécifiques.

L’intérêt des microsystemes flexibles de production porte essentiellement sur la réalisation de produits obtenus par l’assemblage de microcomposants présentant des incompatibilités de fabrication avec les techniques actuelles de lithographie. Les composants pourront être fabriqués par des moyens de microfabrication bien maîtrisés à cette échelle, tels que la gravure du silicium obtenue par lithographie en salle blanche. Les assemblages réalisés entre les composants par ces microsystemes de production seront pour la plupart constitués de liaisons complètes rigides non démontables.

Enfin, notre travail se focalise sur la production des pièces avec un niveau d’automatisation comparable à ceux observés dans le domaine de la mécanique de sous-traitance, qui inclut les notions de flexibilité, de productivité et de réactivité.

#### ***3.2. Démarche d’analyse en vue de la conception***

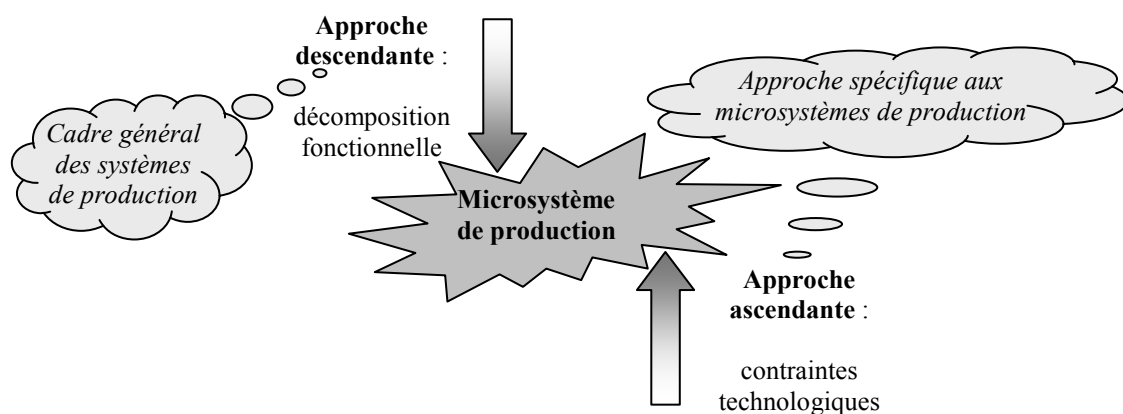
L’objectif de cette démarche est de proposer une architecture modulaire permettant de définir complètement les cellules qui vont composer la plate-forme de production.

La plupart des méthodes de conception intègre les différents axes qui capitalisent les vues fonctionnelle, informationnelle et comportementale du système (Yourdon, 1989). Le modèle fonctionnel est développé avec l’outil SADT™ (Marca, 1987), le modèle informationnel est réalisé avec l’outil UML (Pilone, 2006) et l’axe comportemental est développé à l’aide de plusieurs outils : modèles à état, Grafcet (CEI, 2002), scénarii d’exécution. Ces outils

permettent de caractériser une démarche « descendante » qui convient à la plupart des systèmes de production. Cette démarche permet d'aboutir à un niveau global de description dans chacune des cellules qui s'exprime par la définition et la synchronisation de tâches. Cependant, elle reste insuffisante pour atteindre un niveau détaillé dans la description physique pour chaque cellule (nature, fonction, composition) et ainsi définir des modèles de commande adaptés aux différents actionneurs présents.

Cette démarche est donc complétée par une approche « ascendante » qui est guidée par les contraintes technologiques et c'est en cela que se distinguent les microsystèmes de production des autres systèmes (voir figure 1). En effet, la structure et le découpage en module d'un microsystème de production est très fortement dépendant de la technologie des matériels utilisés. L'analyse des constituants technologiques de chaque cellule permet de caractériser des représentations de modules élémentaires.

Comme nous l'avons détaillé précédemment, il n'existe pas d'offre nourrie en matière de cellule ou même d'équipements de cellule. Il résulte que les besoins spécifiques sont couverts par des études scientifiques et des développements réalisés dans les laboratoires de recherche. Sont ainsi mis au point, non seulement les micro-actionneurs, les micropréhenseurs, les microcapteurs, mais aussi toute la commande associée (modèles et constituants) incluant l'environnement du constituant (Rakotondrabe, 2006). De plus, chacune des compositions regroupant plusieurs constituants matériels peut se voir dotée d'une « intelligence » lui permettant de s'auto-adapter à son environnement.



**Figure 1.** Démarche générale de conception des microsystèmes de production

### 3.3. Mise en œuvre des outils

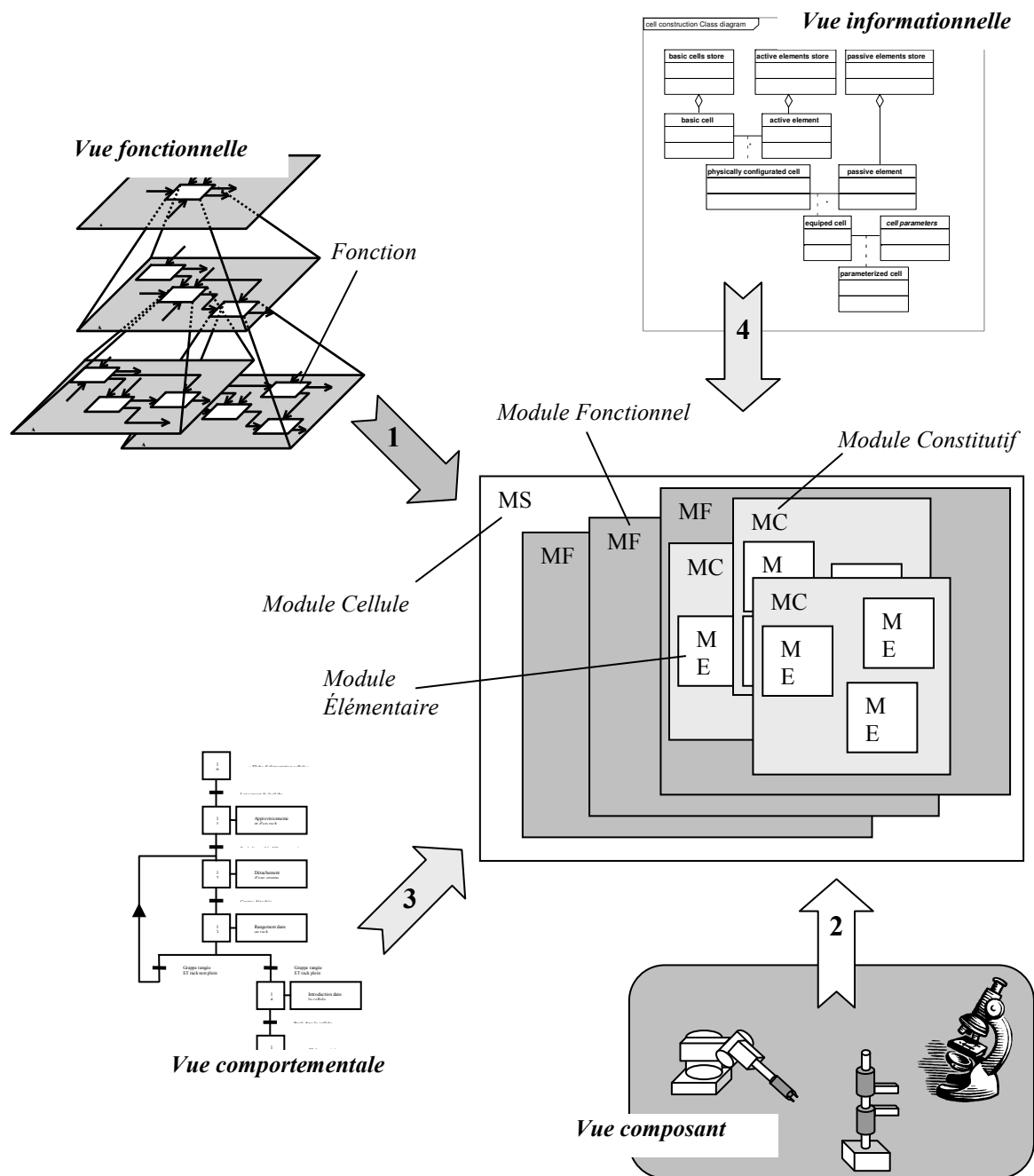
La démarche complète de conception de l'architecture modulaire d'un microsystème de production est décrite sur la figure 2.

En premier lieu (1 sur la figure 2), le modèle fonctionnel décrit par SADT permet de projeter une décomposition en « modules fonctionnels ». Chacun des modules fonctionnels est indépendant et sa mise en œuvre réalise une fonction. Il y a autant de modules fonctionnels que de fonctions identifiées au plus bas niveau de décomposition de chaque actigramme de SADT.

La suite de la méthodologie (2 sur la figure 2) consiste à définir des « modules élémentaires » basés sur les choix matériels. Les actionneurs sont représentés par des modules élémentaires qui intègrent différents paramètres tels que loi de comportement, modèle cinématique ou géométrique, données de calibration. Les lois de commande sont également considérées

comme des modules élémentaires. Enfin, le troisième type de module élémentaire représentant les capteurs peut intégrer des lois de transformation du signal, des courbes d'étalonnage, des données de précision.

La partie la plus délicate de la méthodologie consiste à définir un niveau intermédiaire consistant à réunir des modules élémentaires dans le but de leur faire réaliser des tâches fonctionnelles. Cette détermination (3 sur la figure 2) prend appui sur l'analyse comportementale qui permet de définir l'enchaînement des différentes actions nécessaires pour l'exécution de tâches. Nous avons ainsi défini des « modules constitutifs » qui se composent de l'assemblage (association, collaboration, synchronisation) de modules élémentaires et qui s'intègrent dans un module fonctionnel. L'enchaînement des différentes actions réalisées par les modules constitutifs est modélisé par Grafcet.

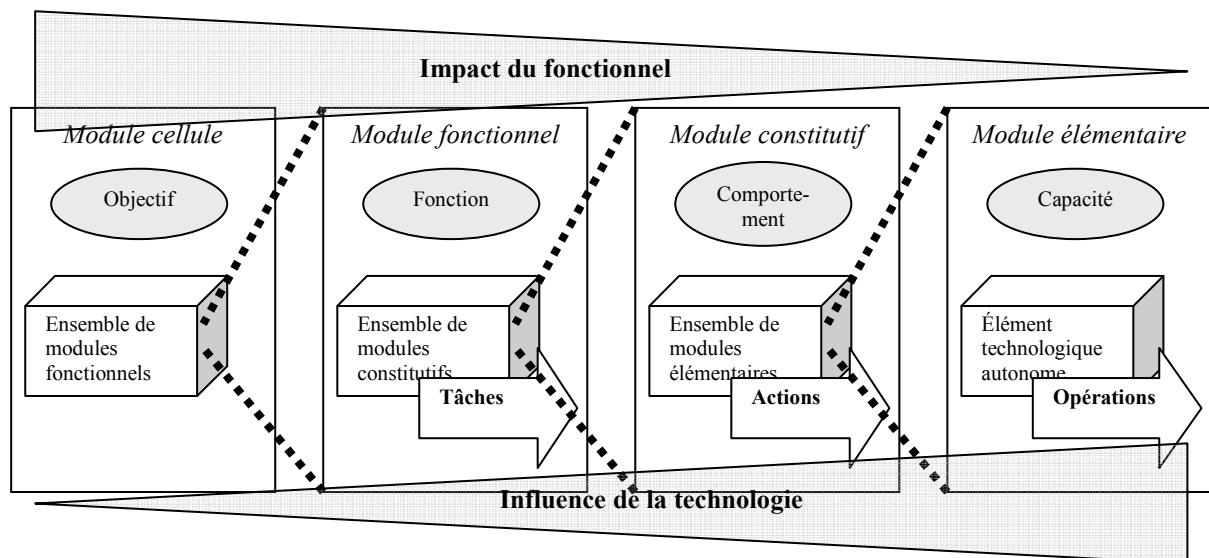


**Figure 2.** Démarche de conception de l'architecture modulaire

Dans notre concept, il est nécessaire de disposer de plusieurs niveaux de modules constitutifs : un module constitutif peut être composé de modules élémentaires mais également inclure d'autres modules constitutifs. Par exemple, un déplacement peut être obtenu par un actionneur seul, avec une loi de commande basée sur un modèle de l'actionneur (correction d'hystérésis, par exemple) ; dans ce cas, le module constitutif est composé d'une loi de commande et d'un actionneur. On peut alors souhaiter associer un capteur de vision à cet actionneur pour réaliser un asservissement visuel en conservant la correction d'hystérésis : le module constitutif est alors composé du module constitutif précédent, d'une commande et d'une caméra. Un module constitutif peut ainsi être composé de plusieurs modules élémentaires et de plusieurs modules constitutifs.

En dernier lieu, le modèle UML, issu de l'étude du système d'information (4 sur la figure 2), permet de constituer l'ossature de la décomposition modulaire de la cellule. La précision du modèle UML est un atout essentiel pour décrire les caractéristiques du système et construire un modèle de commande adapté (Descourvières, 2006). En effet, les microsystèmes de production étant très sensibles aux perturbations diverses (température, hygrométrie, vibrations, charges électrostatiques, poussières), il est souvent important de pouvoir disposer de commande robuste.

Les particularités technologiques des composants utilisés dans les microsystèmes de production impactent fortement l'organisation des modules. La figure 3 montre en quoi l'organisation apparaît comme le résultat de l'intersection entre les modèles fonctionnels et les modèles technologiques.



**Figure 3.** Organisation opérationnelle : définition des modules

La mise en place de ces outils permet ainsi de définir complètement les modules, dans leurs aspects matériel et logiciel, à partir de la spécification et des contraintes technologiques des composants.

#### 4. Application : projet « PRONOMIA »

La méthodologie proposée est utilisée pour définir une conception modulaire d'un système de micro-assemblage étudié dans le cadre du projet de recherche français PRONOMIA (Gauthier *et al.*, 2006a). Ce projet, financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et débuté en

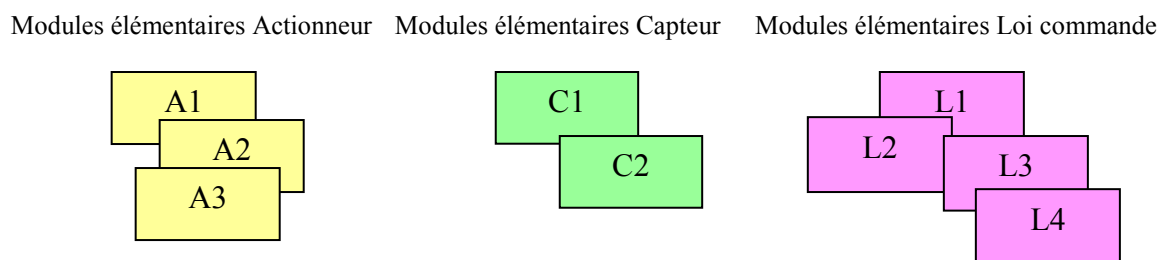
décembre 2005, est centré sur l'étude de l'assemblage automatique d'objets dont la taille caractéristique est située entre 1µm et 100µm ([www.lab.cnrs.fr/pronomia](http://www.lab.cnrs.fr/pronomia)). Ce projet se place dans le contexte du micro-assemblage de composants dans un milieu liquide, permettant de limiter les problèmes d'adhésion et d'électrostatique (Gauthier *et al.*, 2006b), de façon automatisée.

L'objectif terminal de PRONOMIA est d'intégrer les différentes fonctions pour la réalisation d'un démonstrateur validant expérimentalement l'ensemble du projet. L'étude des différentes interactions entre les fonctions (préhension, transfert, perception) développées dans ce projet est nécessaire à la réalisation du démonstrateur. La démarche de conception présentée dans cet article et utilisant la notion d'architecture modulaire est mise en œuvre dans le projet PRONOMIA. Il est à noter que le choix d'un milieu liquide ne modifie pas la démarche de conception d'architecture modulaire.

#### 4.1. Modules élémentaires

Les modules élémentaires (voir figure 4) sont de trois types :

- les modules élémentaires « Actionneur »,
- les modules élémentaires « Capteur »,
- les modules élémentaires « Loi de commande ».

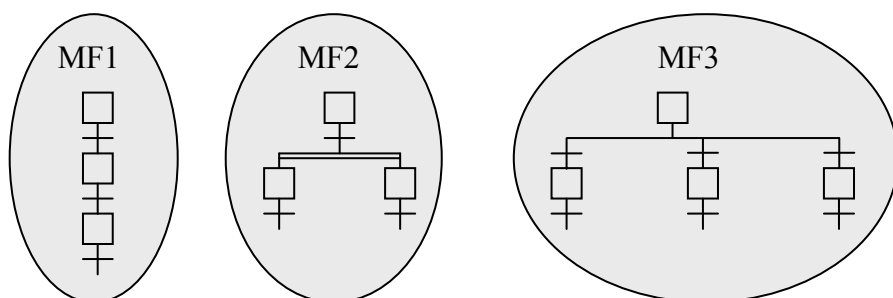


**Figure 4.** Définition des modules élémentaires

Si un composant matériel, type poutre piézo-électrique peut servir d'actionneur ou de capteur, il appartient à deux modules élémentaires différents, c'est-à-dire un module élémentaire actionneur piézo-électrique dans lequel un modèle d'actionnement lui est associé et un module élémentaire capteur piézo-électrique qui intègre des caractéristiques comme la linéarité, l'hystérésis, ou encore des données d'étalonnage.

#### 4.2. Modules fonctionnels

Les modules fonctionnels sont issus de l'analyse fonctionnelle. Chaque fonction identifiée dans SADT donne lieu à une séquence, exprimée par une structure grafcet comportant des actions ; chacune des structures correspond à un module fonctionnel (voir figure 5).



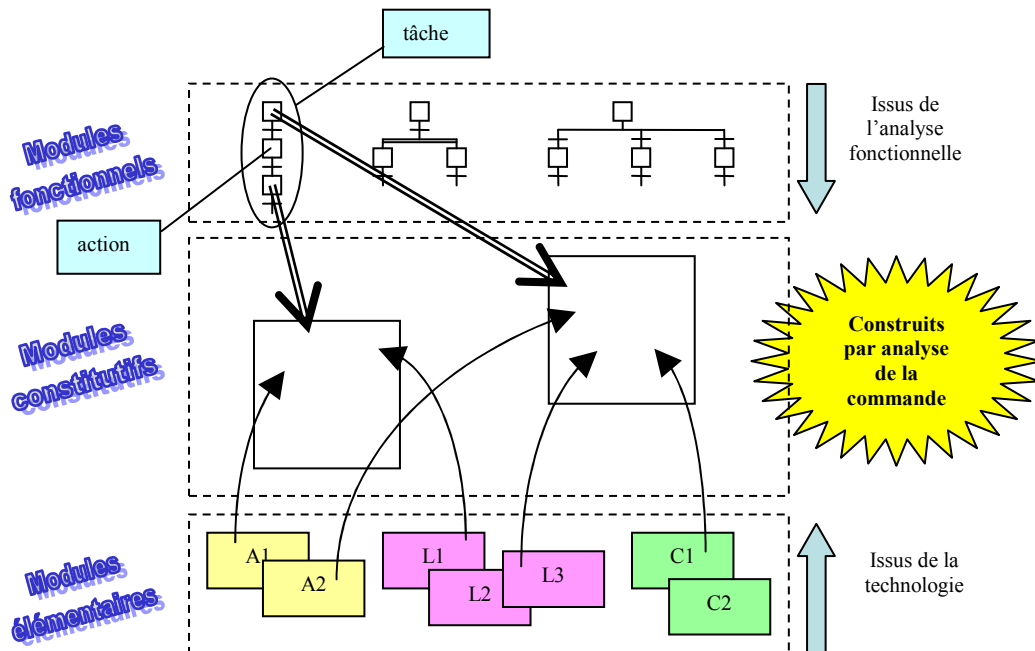
**Figure 5.** Établissement des modules fonctionnels



Un exemple de tâche réalisée par un module fonctionnel peut être une opération de prise-dépose d'un objet à l'aide d'une pince. Le modèle grafcet permet de représenter l'enchaînement séquentiel des actions réalisées par des modules constitutifs permettant de réaliser la tâche « prise-dépose ».

#### 4.3. Modules constitutifs

Les modules constitutifs sont construits à partir d'une composition de modules élémentaires, dans l'objectif de réaliser chaque action du grafcet représentant un module fonctionnel. La description de la méthode générale est explicitée sur la figure 6.



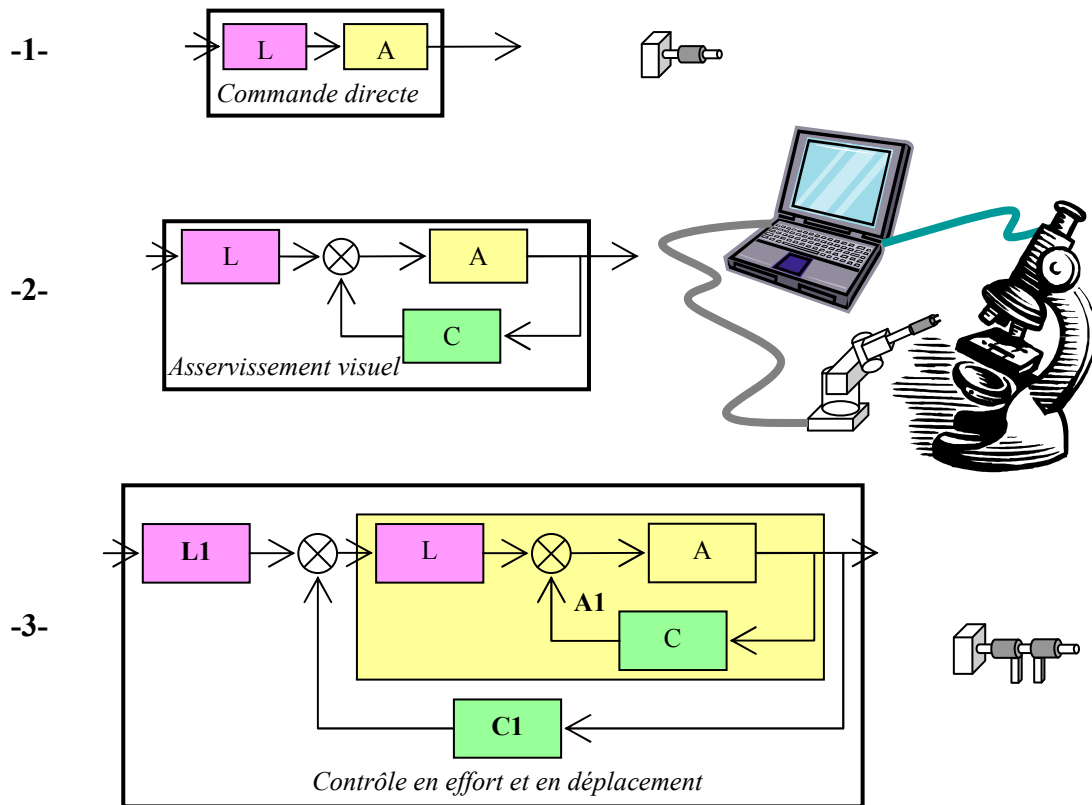
**Figure 6.** Construction des modules constitutifs

Les modules constitutifs peuvent intégrer différents types de composants et différents types de commande. Les trois exemples de la figure 7 illustrent ces principes.

Le premier cas (1 sur la figure 7) présente une commande en boucle ouverte. Le module élémentaire actionneur est constitué d'un axe à deux degrés de liberté (une translation et une rotation) nommé « Tring module » sur lequel on peut monter un préhenseur de type doigt. L'axe est mû par six actionneurs piézo-électriques et doté d'une commande robuste (Rakotondrabe, 2006).

Le second cas (2 sur la figure 7) présente un asservissement en boucle fermée. Le microrobot, vendu par la société Kleindiek, constitue l'actionneur et possède une commande permettant de générer des trajectoires dans l'espace. Un imageur est associé au robot et est capable de délivrer des informations sur la position du préhenseur et de la pièce qui est manipulée.

Le dernier cas (3 sur la figure 7) présente une double commande imbriquée. Deux axes « Tring-module » sont dotés chacun d'un doigt actif de type poutre piézo-électrique. Cet ensemble a la capacité de saisir un objet micrométrique, le maintenir sans l'écraser et le déplacer d'une position à une autre sans le lâcher. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une commande en effort et en déplacement. Dans cette configuration, une des poutres piézo-électriques sert de capteur d'effort et la position est donnée par un capteur associé au « Tring-module ».



**Figure 7.** Exemple de modules constitutifs

Cette modularité permet ainsi de construire de manière flexible tout type de sous-ensemble pour permettre la fabrication et l'assemblage de produits micromécaniques.

## 5. Conclusion

Si la conception des systèmes de production a fait l'objet d'analyses et de méthodes éprouvées depuis de nombreuses années, le milieu du micromonde fait naître des problématiques nouvelles dans ce domaine : indéterminisme du processus, inaccessibilité du milieu, approche par composant modulaire. Nous proposons une méthode d'analyse complète qui intègre la prise en compte des spécificités des microsystèmes de production et qui s'appuie à la fois sur l'analyse fonctionnelle et sur la technologie pour aboutir à une structure modulaire répondant à toutes les caractéristiques des systèmes de production modernes : flexibilité, productivité, réactivité.

## 6. Références bibliographiques

Commission Électronique Internationale (2002) « Langage de spécification GRAFCET pour diagrammes fonctionnels en séquence », Norme Internationale / International Standard, CEI/IEC 60848, 2002, 94 pages.

Descourvières E., Gendreau D., Lutz P. (2006) « Data representation for the control of full-automated microfactories », Proc. (CD ROM) of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Microfactories, IWMF'06, 25-27 octobre, Besançon, France.

Gauthier M., Hériban D., Gendreau D., Régner S., Chaillet N. (2006a) « Micro-factory for submerged assembly: Interests and Architectures », Proc. (CD ROM) of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Microfactories, IWMF'06, 25-27 octobre, Besançon, France.

- Gauthier M., Régnier S., Rougeot P., Chaillet N. (2006b) « Forces analysis for micromanipulation in dry and liquid medium », *Journal of Micromechatronics*, vol. 3, n°3-4, pp. 389-413.
- Gendreau D. (1991) « Génération automatique des procédures de pilotage d'une cellule flexible de production », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris, soutenue le 20 décembre 1991.
- Lefur E., Mathieu L. (1990) « Méthodes d'optimisation sous contraintes appliquées à la détermination des conditions de coupe », *La Gamme automatique en usinage*, Hermès, N°ISBN 2-86601-255-0, chapitre 10.
- Marca D.A., McGowan C.L. (1987) « SADT : structured analysis and design technique » McGraw-Hill, N°ISBN 0070402353, 392 pages.
- Opitz H., König W. (1969) « On the wear of cutting tools », 8<sup>th</sup> M.T.D.R. Conference, Montreal, pp.173-189.
- Pilone D. (2006) « UML 2.0: Pocket Reference », Rev Edition, N° ISBN 0596102089, 136 pages.
- Rakotondrabe M. (2006) « Développement et Commande Modulaire d'une Station de Micro-assemblage », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, soutenue le 30 novembre 2006.
- Yourdon (1989) « Modern Structured Analysis and Systems Specification », Englewood Cliffs, New Jersey: Yourdon Press.